

III-022 - MONITORAMENTO AMBIENTAL DO TRECHO EXPERIMENTAL CONTENDO AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO

Raquel Luísa Pereira Carnin⁽¹⁾

Química Industrial pela Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE). Mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Doutora em Química Inorgânica pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Pesquisadora da Tupy.

Carlos Jorge da Cunha⁽²⁾

Químico pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestrado em Química pela Universidade de São Paulo (USP) e PhD Química em pela York University.

Endereço⁽¹⁾: Rua: Victor Konder, 600 – Bairro: Ipiriú - Joinville – Santa Catarina - CEP: 89.227-240 - Brasil - Tel: +55 (47) 4009-8851 - Fax: +55 (47) 4009-8641 - e-mail: raquel@tupy.com.br

RESUMO

As areias de fundição representam um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção. Somente no Brasil são gerados cerca de 3 milhões de toneladas por ano. A maior parte destes resíduos é disposta em aterros com custos para os geradores e impactos ambientais. O objetivo deste estudo foi de avaliar a possível alteração de qualidade causada pela aplicação da areia descartada de fundição através de monitoramentos ambientais num trecho experimental. O monitoramento consistiu na premissa de viabilizar ambientalmente a aplicação de areia descartada de fundição na construção de um trecho experimental de concreto asfáltico usinado a quente na Estrada dos Tenentes, marginal da BR 381 Rodovia Fernão Dias, do município de Extrema do estado de Minas Gerais.

PALAVRAS-CHAVE: Areia descartada de fundição, monitoramento ambiental.

INTRODUÇÃO

As areias de fundição representam um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção. Somente no Brasil são gerados cerca de três milhões de toneladas por ano (ABIFA, 2009).

A extração da areia usada para a construção civil aliado ao acúmulo de areia descartada de fundição em aterros causa significativos impactos ambientais. Por isso, o reaproveitamento da areia descartada de fundição deveria ser incentivado para a redução do quantitativo de areia extraído da natureza.

Alguns estudos preliminares sobre o uso de areia descartada de fundição como agregado para aplicações na construção civil já foram feitos no Brasil (CARNIN, 2008; COUTINHO, 2004; STEFENON, 2003; BONET, 2002, BONIN, 1995 e BINA *et al*, 2000) com resultados satisfatórios.

O relatório desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – EPA de 2006 demonstra que os maiores volumes de areia descartada de fundição estão sendo utilizados em geotécnica, em aplicações como em bases de estradas e cobertura de aterros. Destaca que, dependendo da qualidade da areia descartada de fundição, esta poderá ser um excelente agregado para a produção de cimento Portland, concreto asfáltico e produtos de concretos. Em casos mais restritos, a areia descartada de fundição está sendo usada em solos agrícolas e outras aplicações como a compostagem.

O reaproveitamento de resíduos de fundição na Europa é recente, no entanto em franco desenvolvimento, por ser considerado uma prioridade dentro da indústria européia por seus benefícios de preservação ambiental e econômico.

No Brasil, tanto no Estado de Santa Catarina como no Estado de São Paulo, a areia descartada de fundição pode ser utilizada em concreto asfáltico e artefatos de concreto sem função estrutural de acordo com as normas legais de cada um dos estados Santa Catarina Resolução CONSEMA 011/2008 e São Paulo Decisão de Diretoria nº 152/2007/C/E.

Trechos experimentais são ferramentas utilizadas para a análise ambiental para possíveis materiais rodoviários. Com o objetivo de avaliar a adição de areia de descartada de fundição em concreto asfáltico, foi realizado o monitoramento de risco potencial ao meio ambiente para os materiais aplicados na pista experimental por meio dos ensaios de lixiviação, solubilização e da água percolada.

A Areia Descartada de Fundição apresentada adiante apenas como ADF, por se tratar de uma sigla já consagrada no âmbito das fundições e dos órgãos públicos ambientais do Brasil, ao se referir ao assunto.

REVISÃO DE LITERATURA

A areia de fundição é uma mistura de vários elementos que se combinam dando características de perfeita trabalhabilidade da mistura que compõe a caixa de moldagem.

Maleabilidade, compatibilidade, refratariedade, coesão, resistência a esforços mecânicos como compressão e tração, expansividade volumétrica, permeabilidade e perfeita desmoldagem são algumas características que a areia adquire devido sua mistura (BONIN, 1995).

A areia de fundição é constituída basicamente por: areia, pó de carvão, bentonita e água.

O principal componente da areia utilizada nas fundições é um agregado fino, mineralogicamente puro, denominado “areia base”. A areia base é constituída essencialmente de sílica (óxido de silício – SiO_2).

A bentonita é um silicato de alumina hidratado (contém em sua composição silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, potássio e sódio). É formada por lamelas, sendo classificada pela espessura das mesmas.

De um modo geral, o pó de carvão é formado por matéria volátil, carbono fixo, cinzas, água e enxofre.

A característica principal da água na mistura da areia de moldagem é tornar possível a propriedade coesiva dos elementos da mistura através do aumento da umidade.

Em síntese, os moldes conformam as faces externas ao passo que os machos conformam as faces internas da peça metálica.

Preparo da Areia de Fundição

O processo de moldagem é do tipo regenerativo. O material que chega ao final do ciclo de trabalho retorna através de correias transportadoras ao início do processo, reutilizando a mesma areia. Pelos motivos de perda de volume e da descaracterização dos componentes da mistura, torna-se necessário o descarte de parte da areia de fundição, gerando a ADF – Areia Descartada de Fundição, e a freqüente reposição de matérias-primas e o controle de qualidade.

A areia de fundição é preparada por meio da descarga de areia nova e areia usada, com a quantidade de água calculada por um controlador de compatibilidade, de modo que a areia caia na máquina de moldar com a umidade final pretendida. A quantidade de água certa para o teor de bentonita pode ser verificada no momento em que é efetuada a mistura, podendo esta ser corrigida (SCHULZ, 2005). Os demais aditivos são injetados no recipiente de mistura, que funciona continuamente.

O misturador é o elemento principal para a preparação de areia de fundição, onde são misturadas a areia lavada e areia retorno, bentonitas ativada e natural, pó de carvão e água. Na Figura 1 pode-se verificar o aspecto físico das bentonitas e do pó de carvão.



Figura 1. Matérias primas da areia de fundição (PEREIRA, 2005).

Pavimentação Asfáltica

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplanagem, para resistir aos impactos do tráfego de veículos e do clima e propiciar aos usuários as condições adequadas de rolamento com conforto, economia e segurança.

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos, formados por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço de subleito.

O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego, impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de rolamento.

Ligantes Asfálticos

O asfalto é um dos mais antigos materiais utilizados pelo homem. Escavações arqueológicas realizadas comprovaram a sua utilização em épocas anteriores à nossa Era. Na Mesopotâmia era usado como aglutinante em trabalhos de alvenaria e construção de estradas. Os reservatórios de água e as salas de banhos eram impermeabilizados com asfalto. Citações bíblicas revelam sua aplicação como impermeabilizante na Arca de Noé. Os egípcios utilizaram o asfalto em trabalho de mumificação. A história registra que o asfalto tende a se perpetuar ao longo dos séculos (IBP, 1999).

Segundo LEITE (1999), o asfalto é considerado como o resíduo formado no processo de destilação a vácuo do petróleo, utilizado como ligante dos agregados minerais na formação do pavimento asfáltico. No Brasil este ligante é conhecido como cimento asfáltico de petróleo (CAP), nos Estados Unidos, como “asphalt cement” e na Europa, como “bitumen”.

Agregados

A ABNT por meio da NBR 9935/2005 define “agregado” como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas à produção de argamassa e concreto.

A quantidade de agregado mineral em misturas asfálticas de pavimentação é geralmente de 90 a 95% em peso e 70 a 85% em volume, esta parcela mineral é parcialmente responsável pela capacidade de suporte de cargas dos revestimentos, influenciando assim o desempenho dos pavimentos.

Concreto Asfáltico Usinado a Quente – CAUQ

Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) é um revestimento flexível, resultante da mistura a quente de agregado graúdo, miúdo, material de enchimento e CAP, de acordo com proporções definidas previamente em laboratório, para atender os requisitos granulométricos, de densidade, de vazios e de resistência, compatíveis com padrões.

Um concreto asfáltico se caracteriza por ser a operação de mistura precedida do aquecimento de seus componentes à temperaturas elevadas, entre 140 °C e 180 °C e sua distribuição e compactação na pista serem também precedidas do aquecimento da mistura em temperaturas entre 80 °C e 140 °C. Devido a ligação entre

agregados, os CAUQs são capazes de resistir bem às ações mecânicas de desagregação produzidas pelos veículos (BONET, 2002).

Considerações sobre o Trecho Experimental

Para verificar o comportamento ambiental da mistura asfáltica com ADF, sob atuação das variações climáticas de temperaturas e efeito da umidade foi construído um trecho experimental, com a execução do monitoramento ambiental.

Em 2006 foi realizada uma parceria da Tupy S.A. com o Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes – DNIT, Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR e Instituto Militar de Engenharia – IME para a execução de um trecho experimental contendo ADF. Na parceria foi incluída a Fundação Fagor com sede na cidade de Extrema -MG, que forneceu a ADF gerada pela empresa, para fins de comparação de resultados.

O trecho experimental foi realizado na Estrada dos Tenentes, marginal da BR/381 Rodovia Fernão Dias, no município de Extrema do estado de Minas Gerais. A escolha do local foi em função da solicitação da Prefeitura Municipal de Extrema e de acordo com o DNIT.

O trecho experimental foi implantado em consideração a execução de seis segmentos, sendo que serão apresentados neste capítulo os três segmentos equivalentes ao CAUQ (Tabela 1).

Tabela 1. Demonstrativo dos segmentos para estudo do ADF como agregado em pavimentação realizado em Extrema-MG.

Mistura a Frio	CAUQ
Areia convencional	Areia convencional
ADF Fagor	ADF Fagor
ADF Tupy	ADF Tupy

Os três segmentos com o revestimento tipo pré-misturado a frio são com areia convencional, com ADF gerada da Fundação Fagor, localizada em Extrema - MG e da Tupy S.A., localizada em Joinville – SC.

A extensão executada foi de 120 metros de comprimento, com largura de 6,50 m. O trecho experimental foi aberto ao tráfego comercial com volume médio de 44 veículos por dia, obtendo-se um número N de $1,1 \times 10^6$ (eixo padrão de 8,2 ton.).

A estrutura foi formada por 5 cm de espessura de revestimento em CAUQ 15 cm de base composta com material tipo bica corrida, fornecida pela Prefeitura Municipal de Extrema, assente sobre subleito heterogêneo, conforme Figura 2.

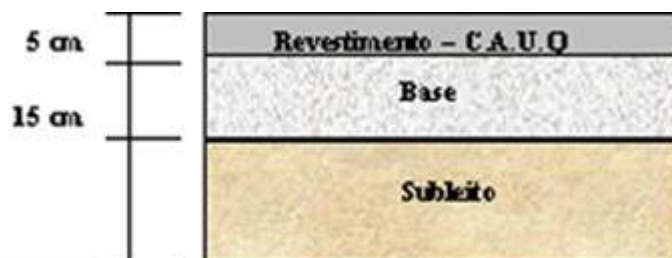


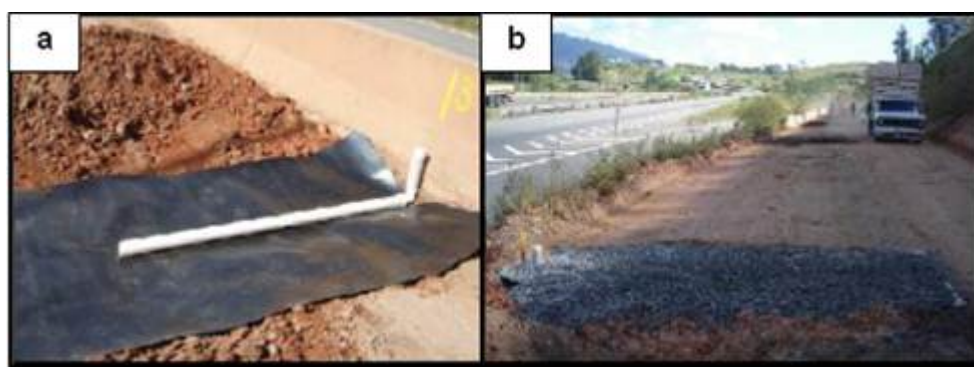
Figura 2. Ilustração a seção realizada para o pavimento do trecho experimental de Extrema-MG.

Visando o monitoramento ambiental foram instalados sistemas de drenagem da água pluvial, que transpassa o pavimento para posterior coleta e verificação de uma possível contaminação do solo devido à presença dos diferentes tipos de ADF (Tupy e Fagor).

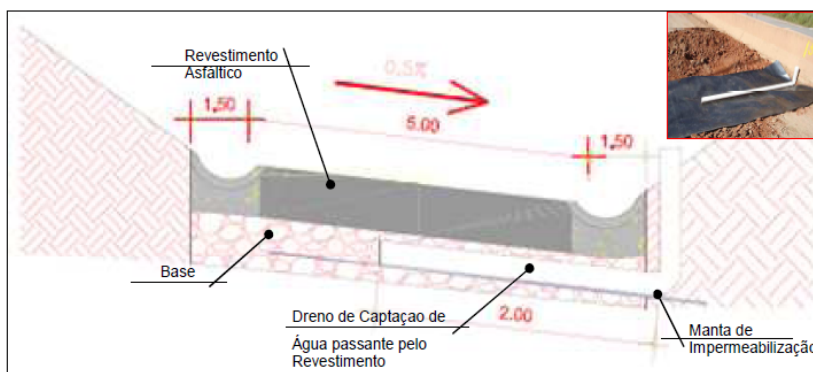
Os tubos de coleta foram instalados no meio de cada trecho evitando desta forma a contaminação causada por materiais de trechos vizinhos, conforme ilustram as Figuras 3a,b,c. A água da chuva percolada no trecho experimental foi coletada através de seringas e transferidas para frascos plásticos com vedação.

A água da chuva percolada no trecho experimental foi coletadas através de 06 (seis) seringas e transferidas para frascos plásticos com vedação. Foram analisadas quimicamente nas datas padrão de 30, 60, 90 dias, para aferição de materiais carregados por lixiviação e solubilização do asfalto em plena carga e 180 e 365 dias, para determinação de eventuais alterações sob condições climáticas e maior índice de ocorrências de fraturas e oxidação do concreto.

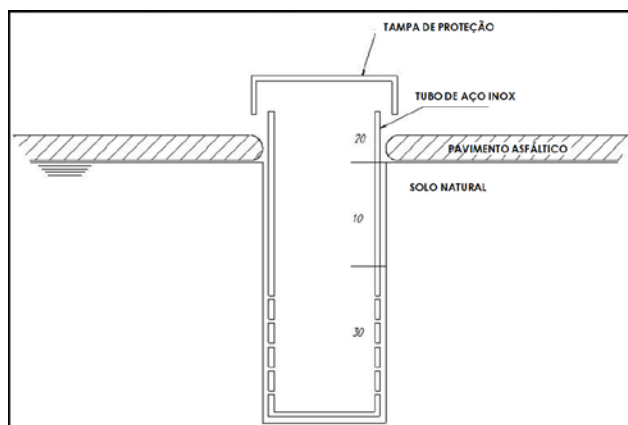
Foram extraídos corpos-de-prova do trecho para realização de análises de lixiviação e solubilização.



(a) Instalação dos drenos de PVC e (b) Envolvimento do dreno com Brita n.º 1.



(c) Seção proposta para avaliação ambiental do trecho experimental de Extrema – MG.



(d) Desenho do tubo coletor de água percolada.

Figuras 3(a,b,c,d). Sistema de captação d'água aplicado na pista experimental em Extrema - MG.

Dosagem da mistura

Foi utilizada a norma DNIT 031/2006 para a determinação das porcentagens máximas e mínimas dos agregados empregados na mistura, adotando a faixa “C”, destinada à camada de revestimento asfáltico, também denominada camada de rolamento. Para dosagem da mistura foi adotado o método Marshall.

Para a adição da ADF em misturas asfálticas foram definidos critérios para estabelecer a quantidade ideal de resíduo a ser incorporado ao concreto asfáltico e/ou outras misturas, para então encontrar a granulometria adequada para a manutenção das características desejadas nas misturas asfálticas, como por exemplo, a percentagem de vazios (% Vv) e relação betume vazios (% RBV).

Foram adicionados dois diferentes teores de ADF nas misturas asfálticas, sendo que a Mistura TUPY com 10% e a Mistura FAGOR com 8%, comparando a um “traço base” denominado de Concreto Asfáltico Referência, cujas porcentagens dos materiais são as seguintes: 20% de brita 1; 35% de pedrisco; 35% de pó de pedrisco e 10% de ADF.

Para o Concreto Asfáltico TUPY foram os seguintes porcentagens de materiais: 25% de brita 1; 30% de pedrisco; 35% de pó de pedrisco e 10% de ADF. Para a mistura de Concreto Asfáltico FAGOR foram aplicados: 25% de brita nº 1; 30% de pedrisco; 37% de pó de pedrisco e 10% de ADF.

Os corpos-de-prova do trecho experimental foram extraídos por meio de sonda rotativa, de forma cilíndrica, com altura entre 3,50 cm a 6,50 cm e diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm (Figura 4).

Os corpos-de-prova extraídos do trecho experimental foram enviados para o IME/IPR para a realização dos ensaios de dos módulos de resiliência (MR) e resistência à tração (RT) (Figura 5).



Figura 4. Sonda rotativa para extração dos corpos de prova do trecho experimental em Extrema - MG.



Figura 5. Corpo de prova do trecho experimental em Extrema-MG.

METODOLOGIA

Para verificar se o uso da ADF como agregado em asfalto poderia causar contaminação ambiental foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização da ADF da Tupy e da Fagor e de corpos de prova extraídos do trecho e também da água percolada coletada no local de estudo. Estes ensaios foram realizados no laboratório TASQA, em Paulínia-SP, de acordo com a ABNT NBR 10.004.

Ensaio de Lixiviação (NBR 10.005)

Uma amostra do resíduo seco é peneirada em malha de 9,5 mm, sendo 100g do material passante transferidos para um frasco de lixiviação, contendo 2.000 mL de solução de extração com agitação de (30 ± 2) rpm durante (18 ± 2) h à temperatura de 25°C. O filtrado obtido é denominado de extrato lixiviado. No extrato lixiviado são analisados diversos parâmetros selecionados por procedimentos específicos de acordo com a Tabela 2.

Ensaio de Solubilização (NBR 10.006)

Uma amostra do resíduo seco é peneirada em malha de 9,5 mm e 250g do material passante são transferidos para um frasco contendo 2500 mL de água deionizada. O frasco foi coberto e deixado em repouso por sete dias, em temperatura até 25°C. O filtrado obtido é denominado de extrato solubilizado. No extrato solubilizado são analisados diversos parâmetros selecionados por procedimentos específicos conforme Tabela 2.

Tabela 2. Técnicas analíticas utilizadas nos ensaios de lixiviação e solubilização.

Parâmetro	Lixiviação	Solubilização
Alumínio		SM 3120B
Arsênio	SM 3120B	SM 3120B
Bário	SM 3120B	SM 3120B
Cádmio	SM 3120B	SM 3120B
Chumbo	SM 3120B	SM 3120B
Cianeto		SM 4500 CN - F
Cloreto		SM 4500 Cl -D
Cobre		SM 3111B
Cromo Total	SM 3120B	SM 3120B
Fenóis Totais		SM 5530C
Ferro		SM 3111B
Fluoreto	SM 4500F-C	SM 4500F-C
Manganês		SM 3111B
Mercurio	EPA 7470 A	EPA 7470 A
Nitrato		SM 4500 F
Prata	SM 3120B	SM 3120B
Selênio	SM 3120B	SM 3120B
Sódio		SM 3111B
Sulfato		SM 4500E
Zinco		SM 3111B

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em 2007 foi executado na Rua dos Tenentes na Cidade de Extrema - MG um trecho experimental com revestimento asfáltico tipo CAUQ empregando o ligante tipo CAP 20. Sendo desenvolvido por meio do Convênio Tecnológico acordado entre: Tupy S.A. e Fundação Fagor Ederlan com Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes – DNIT, Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR e Instituto Militar de Engenharia – IME.

O trecho experimental foi executado pela Prefeitura Municipal de Extrema no período de 09 a 13/04/2007, com o objetivo de obter dados comparativos.

Neste estudo foi feita a comparação entre misturas experimentais com ADF e uma mistura comparativa com areia convencional, sendo que os dois tipos de mistura foram ensaiados sob as mesmas condições.

Os ensaios de lixiviação e solubilização de acordo com a norma de classificação de resíduos NBR 10.004 foram realizados na ADF da Tupy (Tabela 3).

Os resultados de classificação da ADF da Tupy revelaram que somente cinco parâmetros do extrato solubilizado ultrapassaram os limites máximos permitidos, a saber: alumínio, ferro, manganês, sódio e sulfato. Nenhum dos parâmetros do extrato lixiviado extrapolou os limites. Estes cinco parâmetros do extrato solubilizado serão chamados aqui de "parâmetros críticos da ADF".

A fim de compreender a influência dos diversos materiais nos parâmetros críticos na ADF e no corpo-de-prova com ADF, eles também foram analisados nas matérias primas (bentonita natural e ativada, pó de carvão e areia lavada) e os resultados podem ser vistos na Tabela 4. Nesta Tabela também consta a análise da Areia Verde de Fundição (AVF), preparada em laboratório e que não passou pelo processo de fundição.

O elemento sódio aparece na areia lavada utilizada na produção da areia de fundição (Tabela 4). Outra fonte de sódio é a bentonita, o seu teor de sódio é justamente o responsável pela sua utilização no processo de areia de moldagem, uma vez que a hidratação dos íons sódio causa o inchamento entre as lamelas da bentonita.

O sódio é parâmetro de qualidade das águas, pois confere gosto (propriedade organoléptica) a mesma, sabe-se que os parâmetros de solubilização são extraídos dos padrões de potabilidade das águas. Contudo, não é elemento tóxico, tão pouco contamina o meio ambiente.

Os teores de alumínio e sulfato excedem aos limites permitidos no extrato solubilizado da Norma NBR 10.004 e classificam a ADF como Classe II A (Tabela 3).

As matérias-primas da AVF: bentonita natural e ativada e o pó de carvão (Tabela 4), todas de origem mineral, caso fossem consideradas como resíduos sólidos seriam classificadas como Não Inertes pela norma ABNT NBR 10.004.

Foram analisados os corpos-de-prova preparados com 15% de areia convencional e os corpos-de-prova com 15% de ADF. Os resultados podem ser vistos na Tabela 5. Os corpos-de-prova foram triturados, antes do preparo dos extratos, para expor os possíveis contaminantes ao líquido extrator simulando o pior cenário de risco ambiental.

A comparação entre os parâmetros críticos do ADF e os do corpo-de-prova com 15% de ADF permite afirmar que o ligante asfáltico reduziu a extração de todos os íons medidos (Tabelas 3 e 5).

Conforme os resultados apresentados na Tabela 6, os elementos que ultrapassam os valores máximos permitidos da NBR 10.004 da ADF da Fagor são alumínio, ferro e manganês. A concentração dos parâmetros alumínio, sódio e sulfato são bem maiores na ADF da Tupy que na da Fagor sugerindo que estes são influenciados pela salinização da ADF Tupy com água de abastecimento. Os teores de ferro são parecidos na ADF de ambas fundições.

Tabela 3. Parâmetros químicos no lixiviado, solubilizado da ADF da Tupy pela NBR 10.004 (2004).

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾
Alumínio				55,45	0,05	0,2
Arsênio	< LQ	0,005	1	0,01	0,005	0,01
Bário	0,476	0,003	70	0,5	0,003	0,7
Cádmio	< LQ	0,03	0,5	< LQ	0,004	0,005
Chumbo	< LQ	0,2	1	< LQ	0,003	0,01
Cloretos				104	1	250
Cobre				0,02	0,01	2
Cromo Total	< LQ	0,08	5	< LQ	0,013	0,05
Fenóis totais				< LQ	0,001	0,01
Ferro				20,7	0,02	0,3
Fluoretos	0,58	0,07	150	1,32	0,07	1,5
Manganês				0,13	0,02	0,1
Mercúrio	< LQ	0,0002	0,1	< LQ	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				1,2	0,3	10
Prata	< LQ	0,05	5	< LQ	0,01	0,05
Selênio				< LQ	0,007	0,01
Sódio				210	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				300	1	250
Zinco				< LQ	0,01	5

⁽¹⁾ LQ= Limite de Quantificação. ⁽²⁾ VMP = Valor Máximo Permitido.

Os parâmetros que extrapolaram os limites permitidos estão destacados em cinza.

Tabela 4. Comparativo dos Cinco Parâmetros Críticos do Solubilizado das Matérias-primas Constituintes da Areia Verde de Fundição - AVF.

Parâmetros	AVF	Areia Lavada	Bentonita Natural	Bentonita Ativada	Pó de Carvão
Alumínio	2,98	0,044	11,5	6,59	< LQ
Ferro	11,3	< LQ	1,98	3,15	< LQ
Manganês	0,04	< LQ	0,032	< LQ	0,19
Sódio	104	5,64	31,1	7,28	3,58
Sulfato	220	10	48	4	33

Os parâmetros que extrapolaram os limites permitidos estão destacados em cinza.

Tabela 5. Comparativo dos Cinco Parâmetros Críticos do Solubilizado da Areia Convencional, do CAP-20 e de Dois Corpos-de-prova com e sem ADF.

Parâmetros	Areia Convencional	CAP-20	Corpo-de-prova sem ADF	Corpo-de-prova c/ADF
Alumínio	14,9	0,013	0,025	0,17
Ferro	4,55	< LQ	0,041	< LQ
Manganês	0,052	< LQ	0,025	< LQ
Sódio	0,94	0,35	0,72	5,98
Sulfato	4	< LQ	< LQ	< LQ

Os parâmetros que extrapolaram os limites permitidos estão destacados em cinza.

Adição de ADF nas misturas asfálticas do trecho experimental

O corpo-de-prova contendo 10% de ADF Tupy atendeu todos os requisitos exigidos, sendo, portanto classificado como um material inerte. Na Tabela 7 se encontram os resultados do ensaio do lixiviado e do solubilizado do corpo-de-prova, contendo 10% de ADF Tupy.

Os resultados ambientais do CAUQ, com 10% de ADF da Fagor apresentaram alumínio e ferro acima do permitido conforme se observa na Tabela 8.

Os íons que foram solubilizados do ADF da Fagor foram Alumínio (0,45 mg/L) e Ferro 15,45 mg/L, porém quando foram adicionados 10 % de ADF na mistura asfáltica, este apresentou no ensaio de solubilização cerca de 0,25 mg/L de Alumínio e 0,38 mg/L de Ferro e o manganês não foi solubilizado, mostrando que houve uma redução significativa destes íons.

Tabela 6. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado da ADF da FAGOR pela NBR 10.004 de 2004.

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾
Alumínio				0,45	0,05	0,2
Arsênio	< 0,01	0,005	1	< 0,01	0,005	0,01
Bário	4,80	0,003	70	0,40	0,003	0,7
Cádmio	< LQ	0,03	0,5	< 0,001	0,004	0,005
Chumbo	< LQ	0,2	1	< 0,001	0,003	0,01
Cloretos				83,00	1	250
Cobre				0,31	0,01	2
Cromo Total	0,04	0,08	5	0,05	0,013	0,05
Fenóis totais				< 0,01	0,001	0,01
Ferro				15,45	0,02	0,3
Fluoretos	< 0,20	0,07	150	< 0,20	0,07	1,5
Manganês				1,08	0,02	0,1
Mercúrio	< 0,01	0,0002	0,1	< 0,001	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				1,30	0,3	10
Prata	< 0,01	0,05	5	< 0,01	0,01	0,05
Selênio				< 0,01	0,007	0,01
Sódio				92,00	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				104,00	1	250
Zinco				1,02	0,01	5

ND: Não detectado. ⁽¹⁾ LQ= Limite de Quantificação. ⁽²⁾ VMP = Valor Máximo Permitido.

Os parâmetros que extrapolaram os limites permitidos estão destacados em cinza.

Tabela 7. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado da amostra de CAUQ com 10% de ADF da TUPY pela NBR 10.004 (2004).

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾
Alumínio				0,18	0,05	0,2
Arsênio	< LQ	0,005	1	< LQ	0,005	0,01
Bário	0,15	0,003	70	< LQ	0,003	0,7
Cádmio	< LQ	0,03	0,5	< LQ	0,004	0,005
Chumbo	< LQ	0,2	1	< LQ	0,003	0,01
Cloretos				82,00	1	250
Cobre				< LQ	0,01	2
Cromo Total	< LQ	0,08	5	< LQ	0,013	0,05
Fenóis totais				< LQ	0,001	0,01
Ferro				0,23	0,02	0,3
Fluoretos	0,32	0,07	150	0,10	0,07	1,5
Manganês				< LQ	0,02	0,1
Mercúrio	< LQ	0,0002	0,1	< LQ	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				< LQ	0,3	10
Prata	< LQ	0,05	5	< LQ	0,01	0,05
Selênio				< LQ	0,007	0,01
Sódio				4,32	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				< LQ	1	250
Zinco				< LQ	0,01	5

ND: Não detectado. ⁽¹⁾ LQ= Limite de Quantificação. ⁽²⁾ VMP = Valor Máximo Permitido.

Tabela 8. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado da amostra de CAUQ com 10% de ADF da FAGOR pela NBR 10.004 (2004).

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾
Alumínio				0,25	0,05	0,2
Arsênio	< 0,01	0,005	1	< 0,01	0,005	0,01
Bário	2,00	0,003	70	0,10	0,003	0,7
Cádmio	0,004	0,03	0,5	< 0,0001	0,004	0,005
Chumbo	0,005	0,2	1	0,003	0,003	0,01
Cloretos				62,00	1	250
Cobre				0,20	0,01	2
Cromo Total	0,03	0,08	5	< 0,01	0,013	0,05
Fenóis totais				< 0,01	0,001	0,01
Ferro				0,38	0,02	0,3
Fluoretos	< 0,20	0,07	150	< 0,20	0,07	1,5
Manganês				0,10	0,02	0,1
Mercúrio	< 0,01	0,0002	0,1	< 0,0001	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				0,90	0,3	10
Prata	< 0,01	0,05	5	< 0,01	0,01	0,05
Selênio				< 0,01	0,007	0,01
Sódio				92,00	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				88,5	1	250
Zinco				0,23	0,01	5

ND: Não detectado. ⁽¹⁾ LQ= Limite de Quantificação. ⁽²⁾ VMP = Valor Máximo Permitido.

Análise do percolado do trecho

Foram analisadas as misturas contendo ADF da Tupy, Fagor e areia convencional e seus resultados são descritos nas Tabelas 9, 10 e 11 respectivamente.

Todas as misturas analisadas apresentaram alumínio e ferro acima do estabelecido para o solubilizado, porém não se pode afirmar que estes íons foram solubilizados somente por influência da ADF ou da areia convencional. Pois, a lixiviação envolve alguns fatores como, por exemplo: Contato das superfícies externas ou internas do material com a água; Reações químicas complexas influenciadas pela composição da água e seu pH, carbono dissolvido, disponibilidade de oxigênio; Adsorção superficial dos produtos e transporte da água contendo as espécies lixiviadas para o meio externo.

As prováveis influências nos resultados ambientais do percolado extraído do trecho como a poeira; particulados; chuva e derramamentos; arraste de materiais sólidos e solúveis que caíram sobre o trecho, provenientes de carros ou pelo vento, que podem ter relação com os íons de Alumínio e Ferro e não somente a ADF.

Tabela 9. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado do percolado do trecho CAUQ com 10% de ADF da TUPY pela NBR 10.004 (2004).

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾
Alumínio				1,30	0,05	0,2
Arsênio	ND	0,005	1	ND	0,005	0,01
Bário	2,00	0,003	70	ND	0,003	0,7
Cádmio	ND	0,03	0,5	ND	0,004	0,005
Chumbo	ND	0,2	1	ND	0,003	0,01
Cloretos				85,00	1	250
Cobre				0,66	0,01	2
Cromo Total	0,12	0,08	5	0,12	0,013	0,05
Fenóis totais				ND	0,001	0,01
Ferro				20,16	0,02	0,3
Fluoretos	ND	0,07	150	ND	0,07	1,5
Manganês				ND	0,02	0,1
Mercurio	ND	0,0002	0,1	ND	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				ND	0,3	10
Prata	ND	0,05	5	ND	0,01	0,05
Selênio				ND	0,007	0,01
Sódio				45	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				96	1	250
Zinco				1,20	0,01	5

ND: Não detectado. ⁽¹⁾ LQ= Limite de Quantificação. ⁽²⁾ VMP = Valor Máximo Permitido.

Tabela 10. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado do percolado do trecho CAUQ com 10% de ADF da FAGOR pela NBR 10.004 (2004).

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾
Alumínio				0,95	0,05	0,2
Arsênio	ND	0,005	1	ND	0,005	0,01
Bário	0,80	0,003	70	0,30	0,003	0,7
Cádmio	ND	0,03	0,5	ND	0,004	0,005
Chumbo	ND	0,2	1	ND	0,003	0,01
Cloretos				72,00	1	250
Cobre				0,60	0,01	2
Cromo Total	0,06	0,08	5	0,06	0,013	0,05
Fenóis totais				ND	0,001	0,01
Ferro				34,32	0,02	0,3
Fluoretos	ND	0,07	150	ND	0,07	1,5
Manganês				0,10	0,02	0,1
Mercurio	ND	0,0002	0,1	ND	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				ND	0,3	10
Prata	ND	0,05	5	ND	0,01	0,05
Selênio				ND	0,007	0,01
Sódio				28,00	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				74,00	1	250
Zinco				0,72	0,01	5

ND: Não detectado. ⁽¹⁾ LQ= Limite de Quantificação. ⁽²⁾ VMP = Valor Máximo Permitido.

Tabela 11. Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado do percolado do trecho CAUQ com 10% de areia convencional pela NBR 10.004 (2004).

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾	Resultado	LQ ⁽¹⁾	VMP ⁽²⁾
Alumínio				0,72	0,05	0,2
Arsênio	ND	0,005	1	ND	0,005	0,01
Bário	0,80	0,003	70	0,30	0,003	0,7
Cádmio	ND	0,03	0,5	ND	0,004	0,005
Chumbo	ND	0,2	1	ND	0,003	0,01
Cloretos				72,00	1	250
Cobre				0,60	0,01	2
Cromo Total	0,056	0,08	5	0,06	0,013	0,05
Fenóis totais				ND	0,001	0,01
Ferro				16,47	0,02	0,3
Fluoretos	ND	0,07	150	ND	0,07	1,5
Manganês				0,05	0,02	0,1
Mercurio	ND	0,0002	0,1	ND	0,0002	0,001
Nitrato (expresso em N)				ND	0,3	10
Prata	ND	0,05	5	ND	0,01	0,05
Selênio				ND	0,007	0,01
Sódio				31,00	0,1	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				68,00	1	250
Zinco				0,25	0,01	5

ND: Não detectado. ⁽¹⁾ LQ= Limite de Quantificação. ⁽²⁾ VMP = Valor Máximo Permitido.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises ambientais do percolado obtido do trecho não foram significativas, visto que há interferência de vários fatores, como por exemplo, poeira, água da chuva, arraste de materiais dos carros que trafegam sobre o pavimento. A pesquisa demonstrou que o encapsulamento dos resíduos com ligante asfáltico (CAP) é um processo eficiente para a estabilização dos metais presentes em excesso.

Diante dos resultados dos ensaios ambientais realizados em corpos-de-prova contendo areia convencional e ADF, pode ser afirmado que os materiais não apresentam riscos ao meio ambiente.

No entanto, estes ensaios classificam a ADF como não inerte, ou seja, um resíduo industrial classe IIA. Porém, a areia convencional usada em pavimentação apresentou parâmetros acima do permitido pela legislação. Outro fator relevante é que as matérias-primas constituintes da Areia Verde de Fundação (AVF) também apresentaram parâmetros acima do especificado pela norma NBR 10.004. Estes resultados mostram falhas na Norma NBR 10.004 em avaliar o potencial de agressão ao meio ambiente causada por resíduos.

Em contrapartida, por meio dos resultados de classificação de resíduos sólidos realizados nos corpos-de-prova, comprovou-se que o concreto asfáltico contendo ADF, foi classificado como resíduo inerte.

AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho gostariam de registrar os seus agradecimentos às seguintes pessoas e instituições: TUPY S.A.; FAGOR EDERLAN; DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA EM TRANSPORTES; INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA (em especial ao Coronel Paulo Roberto Dias Morales).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO – ABIFA, 2009. (www.abifa.org.br).
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Agregados – Terminologia – NBR 9935. Rio de Janeiro, 2005.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Resíduos Sólidos – Classificação – NBR 10.004/2004. Rio de Janeiro, 2004.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Lixiviação de Resíduos – Procedimento – NBR 10.005 / 2004. Rio de Janeiro, 2004.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Solubilização de Resíduos – Procedimento – NBR 10.006 / 2004. Rio de Janeiro, 2004.
6. BINA, Paulo; ALVES, José H.; BONIN, André L.; YOSHIMURA, Humberto N. Metodologia de Análise e Aprovação de Utilização de Rejeitos Industriais na Construção Civil: Estudo de Caso de Uso de Areia de Fundação de Descarte para Pavimentação. Monobeton Soluções Tecnológicas Ltda – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT. São Paulo, 2000.
7. BONET, Ivan Iveraldo. Valorização do Resíduo Areia de Fundação (R.A.F.) Incorporação nas Massas Asfálticas do Tipo C.B.U.Q. Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 127p.
8. BONIN, André Luís. Reutilização da Areia Preta de Fundação na Construção Civil. Congresso de Fundação. São Paulo, p-203-221. Setembro, 1995.
9. CARNIN, Raquel Luísa Pereira. Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundação como Agregado em Misturas Asfálticas. Tese de doutorado do Departamento de Química, Centro de Ciências Exatas. UFPR, 2008, 152p.
10. COUTINHO NETO, B. Reaproveitamento do Resíduo de Fundação em Misturas Asfálticas. Universidade Federal de São Carlos. Departamento de Transportes. Tese de Doutorado, São Carlos, 2004. 197p.
11. IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo. Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos. 6ª ed. Rio de Janeiro, 1999.
12. LEITE, Leni, F. M. Estudos Reológicos de Cimentos Asfálticos. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, dezembro, 1990.

13. RESOLUÇÃO CONSEMA 011/08. Critérios para a utilização de ADF de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto não estrutural. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. Conselho Estadual do Meio Ambiente – Consema. Estado de Santa Catarina, 2008, 14p.
14. SCHULZ, Marco Aurélio. Valorização de Resíduos Sólidos Provenientes da Indústria de Fundição: Estudo na Produção de Artefatos de Concreto para Construção civil. Universidade da Região de Joinville. Monografia de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental. 126 pag. 2005.
15. STEFENON, Fernando. Incorporação de Resíduos Industriais em Concreto Betuminoso Usinado à Quente. Universidade de Caxias do Sul. Mestrado Profissionalizante em Engenharia. Caxias do Sul, 2003.